

**2011 International Pittsburgh Coal Conference  
Pittsburgh, PA  
September 12 – 15, 2011**

**Abstract Submission**

**TOPIC: CARBON MANAGEMENT  
POSTER PRESENTATION**

**COMPARISON OF CO<sub>2</sub> FROM COAL CAPTURE PROCESSES AND VALORISATION TECHNOLOGIES  
TO ENHANCE ENERGY SUPPLY**

*Mercedes Martín-González, Mining Engineer, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas  
Alenza 4. 28003 Madrid. Spain  
[mm.martin@alumnos.upm.es](mailto:mm.martin@alumnos.upm.es)  
Phone: +34 615 920 664 Fax: +34 914 570 055*

*Carmen Clemente-Jul, Professor at the Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas  
Alenza 4. 28003 Madrid, Spain  
[carmen.clemente@upm.es](mailto:carmen.clemente@upm.es)  
Phone: +34 913 366 985 Fax: +34 913 366 948*

**Abstract:**

Coal is the most plentiful and evenly distributed fossil fuel worldwide. Based on current production, it is estimated that the reserves will last approximately 130 years. Its use worldwide has been increasing, mainly due to consumption by emerging countries. CO<sub>2</sub> emissions generated by combustion and the repercussions of such on climate change support the view that it could no longer be used. CO<sub>2</sub> capture may be the solution to continue using it, which would cater for the growing energy demand worldwide.

The aim of this study is to compare different processes concerning CO<sub>2</sub> capture that may be economically viable, ultimately showing that coal, a fossil energy source widely distributed around the world, can, as a result of using different CO<sub>2</sub> capture processes, be used as a clean source of electricity. Hence, in places where geological hurdles may render the costs of CO<sub>2</sub> storage considerably higher, since it might have to travel far, coal may be used for other purposes, thus valorising CO<sub>2</sub> within the industrial sector.

This research is focused on the technical and economic comparison of the most relevant CO<sub>2</sub> capture projects designed in Spain using different existing technologies. The oxyfuel project in Ciuden (Leon, Spain), the IGCC Elcogas, precombustion CO<sub>2</sub>-capture project (Puertollano, Spain) and the postcombustion project in Carboneras (Almeria, Spain) will be analyzed in order to assess the options available to valorise captured CO<sub>2</sub>.

Valorising captured CO<sub>2</sub> may be an adequate solution in areas where, although CO<sub>2</sub> capture is still possible, storage is not equally so, thus generating a further benefit. The possible uses of CO<sub>2</sub> will be assessed in vegetable growing greenhouses, harnessing CO<sub>2</sub> in vegetable life cycles. This will also be used in growing algae for subsequent biodiesel production.

Both CO<sub>2</sub> capture and valorising will eventually lead to the clean use of coal, which will thus enhance the level of self-supply, aiding the development of electric vehicles, which require large amounts of electricity, as well as improve the level of energy autonomy in countries around the world. Another type of fuel, biodiesel, will also be obtained, without this affecting international food prices.

Keywords: CO<sub>2</sub> capture, clean coal, valorising technologies

**Objetivo de la Tesis**

El presente abstract extended fija las líneas maestras de la futura tesis, en la que se pretende demostrar cómo el uso sostenible del combustible mejor repartido mundialmente que es el carbón, puede ayudar a los países productores a mejorar su seguridad de suministro, a equilibrar sus importaciones, y a valorizar el CO<sub>2</sub> capturado de tal manera que dicho CO<sub>2</sub>, sea el alimento de algas para la fabricación de bio diesel. De esta forma el uso del carbón para la generación de electricidad de manera limpia contribuirá al desarrollo del coche eléctrico y del alimentado por biodiesel, haciendo de las ciudades, lugares exentos de contaminación, y repercutiendo positivamente en la economía de los países.

## 1 Introducción

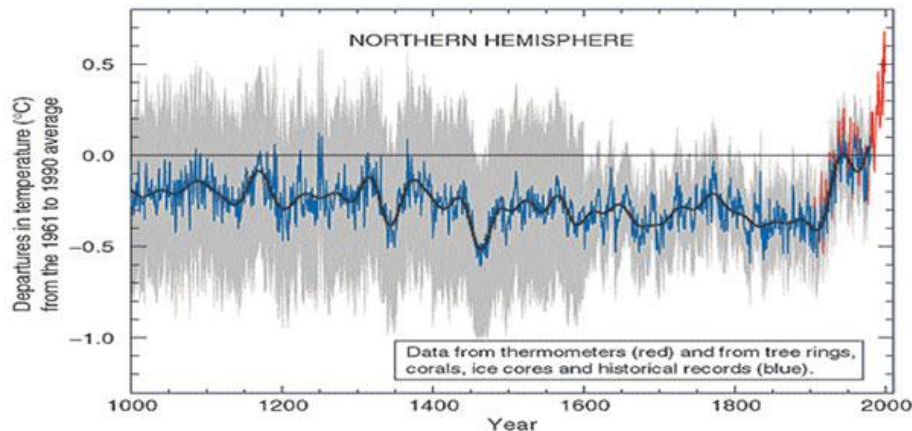
### 1.1 Cambio Climático.

Para entender por qué las emisiones de CO<sub>2</sub>, están afectando al cambio climático y buscar soluciones técnicas, económicas y de compromiso político, que al menos atenúen el problema debemos de ser conscientes de cómo se ha alterado el ciclo de carbono y cómo este desajuste se relaciona con el efecto invernadero.

Ciertos gases de efecto invernadero surgen naturalmente, mientras que otros son de origen antropogénico. En lo que se refiere al proceso de eliminación, todos los gases de efecto invernadero ( H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O ), se eliminan en buena parte a través de reacciones químicas o fotoquímicas dentro de la atmósfera. Por el contrario el CO<sub>2</sub>, entra en mayores cantidades dentro de lo que se conoce como ciclo del carbono, que se ha visto desajustado en los últimos años. Por tanto el problema del CO<sub>2</sub>, no es si carácter nocivo, pues es un gas necesario para la vida, sino su problemática radica en su elevada concentración en la atmósfera que desequilibra su ciclo natural.

Los cambios más significativos en la concentración de CO<sub>2</sub> estudiados, mediante los núcleos de hielo de Vostok, se relacionan principalmente con los ciclos glaciares. Aunque los ciclos glaciares se asocian más directamente con cambios en la órbita de la Tierra, estos cambios también afectan al ciclo del carbono, que a su vez afecta al ciclo glaciar.

Es en los últimos 1000 años, cuando podemos hacer un zoom a la correlación entre CO<sub>2</sub> y temperatura, destacando los últimos 40 años, podemos ver que se rompe la tendencia histórica, y se aprecia el aumento de temperatura.



En los últimos meses también han aparecido diversos trabajos, que desvinculan al CO<sub>2</sub> de la única culpabilidad del cambio climático y probablemente nos encontremos ante una unión de muchos factores no antropogénicos que están provocando la subida de la temperatura. Como en las leyes que gobiernan el comportamiento de la Tierra no podemos influir, si nuestra órbita está más o menos lejos del Sol, si el polo magnético cambia a más o menos velocidad, etc, no podemos hacer nada salvo estudiarlo. Sólo lo nos queda por tanto un único trabajo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y entre ellas el CO<sub>2</sub>. Pues nuestro deber es no esperar al futuro e intentar adivinar qué provocó tal o cuál efecto. Sino anticiparnos y tratar de reducir las emisiones, todo lo posible, intentando aunar el desarrollo ecológico de manera soportable y viable, con el desarrollo económico y social.

### 1.2 Seguridad de suministro.

Es importante destacar este concepto, que debe ser admitido por la sociedad como uno de los problemas a resolver del siglo XXI, en el que están implicadas, tanto las políticas económicas como el desarrollo tecnológico.

La excesiva dependencia energética que existe en numerosos países, principalmente de los miembros de la UE, provoca fuertes desequilibrios en sus balanzas de pagos, que ven cómo aumenta cada día su deuda externa.

Ahondando en la problemática de la seguridad de suministro, debemos tener presente la convulsa situación que viven los mercados energéticos nacionales como consecuencia de los últimos acontecimientos geopolíticos. Respecto a la energía nuclear, al accidente de la central de Fukushima, hay que añadir la decisión de Italia y Alemania de prescindir de la energía atómica. Sin olvidar los recientes conflictos en Libia en materia de petróleo, los cortes de suministro de gas a centro Europa desde Rusia, y la conflictividad permanente de Oriente en materia de gas y petróleo.

Abandonar las explotaciones de carbón, reducir su presencia, y por tanto depender energéticamente de países geopolíticamente conflictivos, no sólo pone en riesgo el suministro de combustibles (gas y petróleo) ante determinadas crisis, sino que deja a los gobiernos y empresas de los países dependientes desprovistos de fuerza a la hora de negociar el suministro energético del país, haciéndolo vulnerable y como consecuencia embrocándolo.

La Captura de CO<sub>2</sub>, tanto su almacenamiento como su valorización, es claramente una solución económicamente rentable para los países productores de carbón, que ven cómo las presiones de la contaminación y del cambio climático, empujan al abandono de este combustible. Por lo tanto, su uso limpio, proporciona seguridad de suministro, contención de los precios de la producción eléctrica, apoyo a la intermitencia de las energías renovables, es fuente de empleo de calidad, y facilitará claramente la posibilidad al desarrollo del coche eléctrico, ya que necesita de un aporte de electricidad, independiente de las condiciones climáticas, generalmente en horas nocturnas, por lo que se necesitará un mix equilibrado de generación eléctrica, donde el carbón con captura de CO<sub>2</sub> tendrá que estar presente.

## **2 Captura transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Proyectos en España.**

En noviembre de 2007 se publicó el Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética <sup>[1]</sup> en que queda de manifiesto los esfuerzos que la Unión Europea deben realizar para producir energía competitiva, segura y sostenible y que los retos relacionados con el cambio climático, seguridad de suministro energético y competitividad requieren una respuesta coordinada.

De esta manera en los últimos años se han financiado proyectos estratégicos de investigación tanto a nivel internacional. A nivel europeo la Plataforma “ Zero Emissions Power” (ZEP)<sup>[2]</sup>, formada por empresas, científicos, académicos y organizaciones no gubernamentales con el objetivo de cooperar en los temas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS).

En España existe la Plataforma Tecnológica Española de CO<sub>2</sub> <sup>[3]</sup>. El alcance general de esta Plataforma es abordar un desarrollo tecnológico en España que contribuya a disminuir el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero en España. Su éxito se está en primer lugar en la numerosa participación de empresas y organismos públicos, y en la difusión de cara a la aceptación social de la Captura y al Almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

De los proyectos de I+D de CCS en España, podemos decir que se están desarrollando diversas tecnologías que comprenden desde el Oxifuel en la planta de Compostilla ( ENDESA) + CIUDEN en el Bierzo ( León, Spain), a la Carbonatación Capturación, proyecto de la empresa pública de minería de carbón HUNOSA+ ENDESA +Foster Wheeler, (Asturias, Spain), el IGCC de ELCOGAS ( Puertollano, Spain), y la central de ENDESA en Carboneras, (Almería, Spain) en la que se está desarrollando tecnología de postcombustión.

### **2.1 Captura en Post-Combustión.**

La captura en Post Combustión se refiere a la separación del CO<sub>2</sub> de la corriente del gas de salida del proceso de combustión. En el caso de las plantas de carbón pulverizado existentes en los parques de generación de muchos países, incluido España, pueden ser subcríticas, supercríticas o ultra-supercríticas, dependiendo de la presión a la que trabajan.

En la actualidad es el método más usado a nivel industrial para la separación de CO<sub>2</sub> de Corrientes diluidas en concentraciones bajas.

En este sistema, el CO<sub>2</sub> se ha separado de los gases de escape producidos durante la combustión (principalmente N<sub>2</sub>) con aire de un combustible (carbón, gas natural etc.). Para su captura posterior, entre los procesos más viables se encuentran el ciclo de Calcinación Carbonatación y la absorción química con aminas.

#### **a) Absorción química.**

En este proceso el CO<sub>2</sub> reacciona con un líquido de absorción. Para ello se utilizan compuestos químicos (aminas y nuevos absorbentes en investigación) con gran afinidad de compuestos ácidos (CO<sub>2</sub>) y se usan como solventes formulados, en una mezcla

especial para atenerse a la tarea de separación. Algunos de ellos también contienen activadores para promover la transferencia de masa en la absorción. En la tabla 1 se muestran solventes usados comúnmente para llevar a cabo esta tarea.

Tipo de solvente	Ejemplo
Aminas primarias	Monoetanolamina (MEA) Diglicolamina (DGA)
Aminas secundarias	Dietanolamina (DEA) Diisopropanolamina (DIPA)
Aminas terciarias	Metildietanolamina (MDEA) Trietanolamina (TEA)
Soluciones de sal alcalina	Carbonato de potasio

Tabla 1 de solventes utilizados en el proceso

Actualmente los siguientes procesos de solvente están comercialmente disponibles para el tratamiento del CO<sub>2</sub>.

1. *Kerr-McGee/ABB Lummus Crest Process (Barchas and Davis, 1992).*
2. *Fluor Daniel ECONAMINE Process (Sander and Mariz, 1992, Chapel et al., 1999).*
3. *Kansai Electric Power Co., Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Process (Mimura et al., 2000).*

El detalle del proceso se observa en la figura 2. El sistema se descompone en dos etapas principales: absorción y regeneración (incremento de temperatura y consumo de energía).

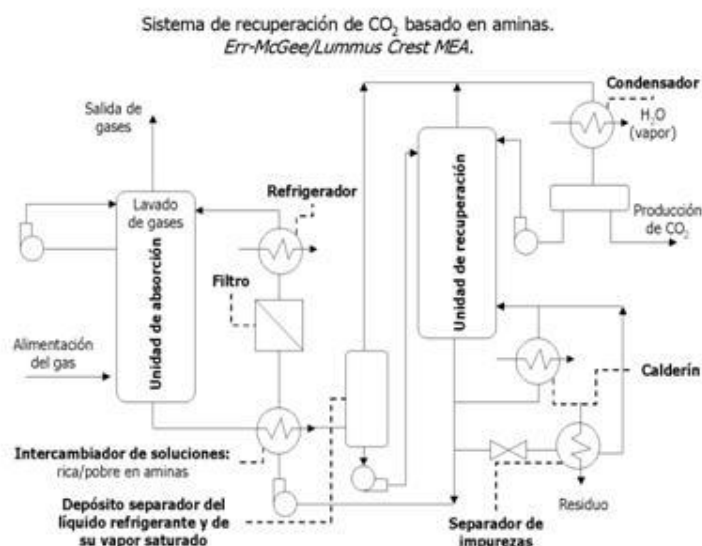


Figura 1 Detalle del proceso de absorción química

Las etapas del proceso se describen básicamente en el esquema de la figura 3. Detallamos las etapas del sistema.

1. El gas que contiene el CO<sub>2</sub> se pone en contacto con un absorbente líquido capaz de capturar el CO<sub>2</sub>.
2. El absorbente cargado con CO<sub>2</sub> se transporta a otra torre donde se regenera mediante cambios de temperatura o presión y libera el CO<sub>2</sub>.
3. El absorbente regenerado se envía de nuevo al proceso de captura de CO<sub>2</sub>.

- Para contrarrestar las pérdidas de actividad del absorbente, se introduce siempre nuevo absorbente.

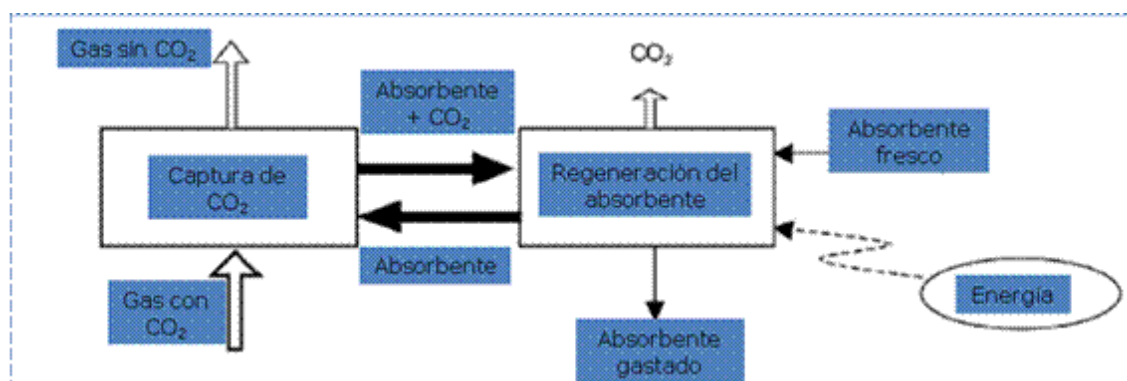


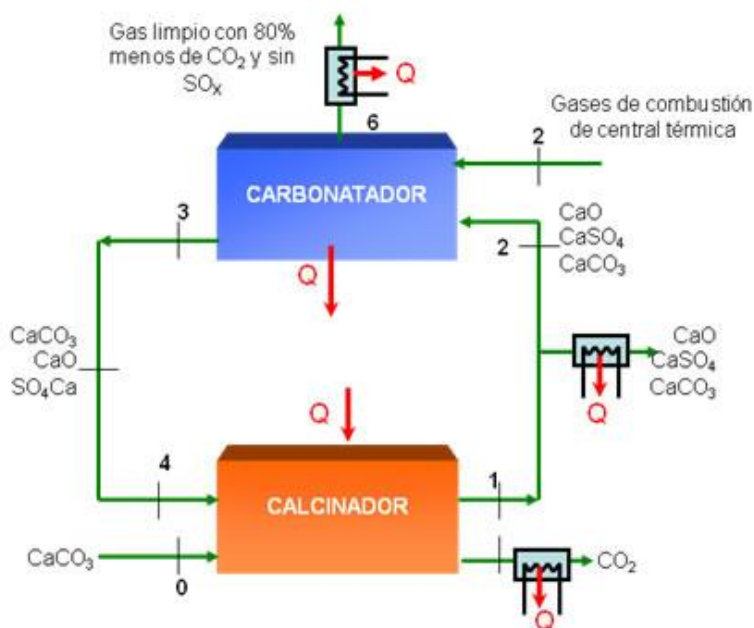
Figura 2. Etapas del proceso de absorción química

Al utilizar este sistema no se pueden despreciar sus características básicas de operación, que pueden determinar su viabilidad. Dentro de ellas mencionamos:

- La reacción química del proceso se realiza a alta temperatura.
- El sistema consta de un reactor a modo de absorbedor y otro que actúa de regenerador de la amina.
- El proceso de regeneración requiere un considerable consumo de energía.
- El sistema necesita de un tratamiento previo a los gases de combustión, debido a que las aminas son altamente atacables por los óxidos de nitrógeno y azufre ( $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ )

#### b) Ciclo de calcinación/carbonatación

Esta combinación de procesos se basa en la absorción química, usando como sorbente a la caliza. Definiendo separadamente, la carbonatación es una reacción exotérmica donde los reactivos  $\text{CO}_2$  y  $\text{CaO}$  reaccionan para producir  $\text{CaCO}_3$ . La energía que se desprende de esta reacción es de 430 kcal/kg  $\text{CaCO}_3$ . La calcinación en cambio es el proceso inverso, pues produce la desorción del  $\text{CO}_2$  y  $\text{CaO}$  mediante la descomposición de la caliza en presencia de calor.



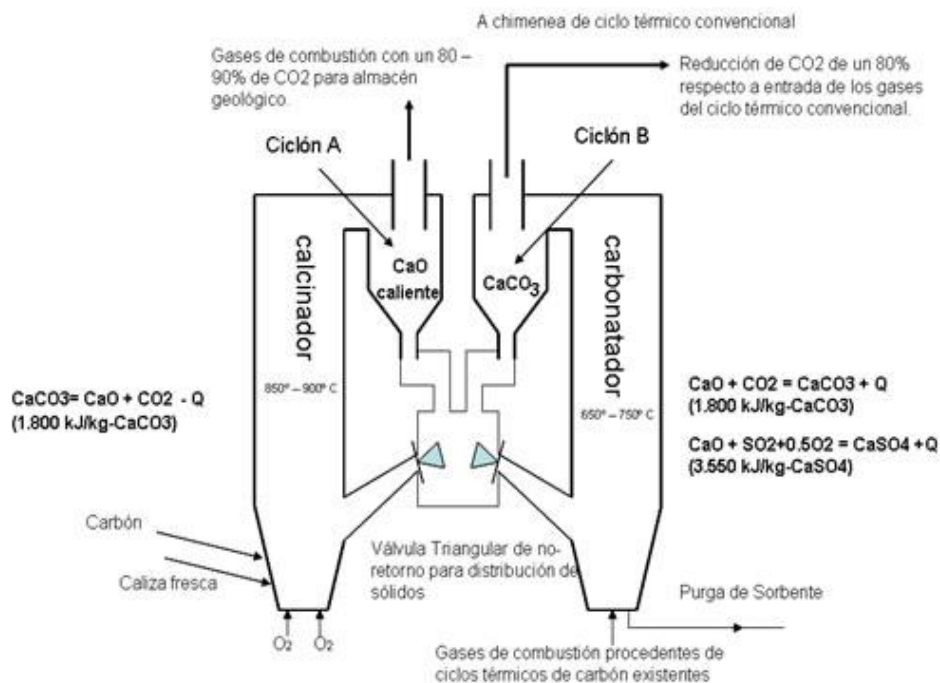


Figura 3. Esquemas de funcionamiento de la tecnología calcinación/carbonatación

Las etapas de este proceso son.

1. La corriente de gases a tratar se toma antes de la entrada a la desulfuradora (D.G.C.).
2. El proceso propuesto trabajará en dos lechos fluidos circulantes interconectados, trabajando a una temperatura de 650 °C el que actúa como carbonatador, y a 875 °C el que trabaja como calcinador.
3. El calcinador trabajará en oxi-combustión, con el objetivo de generar una corriente alta de CO<sub>2</sub> en los gases de salida.
4. La recuperación de calor en el nuevo ciclo propuesto se realizará mediante un ciclo agua-vapor supercrítico

### c) Adsorción física:

Básicamente se encarga de utilizar materiales capaces de adsorber el CO<sub>2</sub> generalmente a altas temperaturas, para luego recuperarlo mediante procesos de cambio de temperatura o presión (procesos TSA y PSA respectivamente). Entre los adsorbentes se encuentran principalmente los carbonos activos y las zeolitas.

El proyecto más emblemático de post-combustión y valorización de CO<sub>2</sub>, se está desarrollando en la central de Carboneras ( Almería, Spain),

### 2.2 Captura en Pre-Combustión

Otra forma de capturar el CO<sub>2</sub>, es aumentar su concentración y su presión parcial antes de llevar a cabo la combustión. Esto requiere la separación del CO<sub>2</sub> una vez el carbón es gasificado y convertido en un gas de síntesis rico en carbono e hidrógeno. Uno de los proyectos bandera de la Unión Europea procedente del VI programa Marco de la UE, es ELCOGAS, situado en la localidad de Puertollano ( Ciudad Real, Spain). Se trata de un IGCC de 335 MW<sub>e</sub> que emplea como combustible una mezcla del 50% de carbón autóctono procedente de la mina a cielo abierto de ENCASUR ( Mina Emma), propiedad de la empresa eléctrica ENDESA, y coque de petróleo procedente de la refinería situada en la misma localidad y propiedad de la empresa REPSOL. De hecho la proximidad a la emblemática refinería hacen de ELCOGAS una de las centrales idóneas para la captura y posterior valorización de CO<sub>2</sub>, sirviendo este último como alimento para una futura plantación de algas para la fabricación de biodiesel en las instalaciones de la refinería propiedad de REPSOL.

ELCOGAS, ha desarrollado una planta experimental de 14 MW<sub>e</sub> con captura de CO<sub>2</sub>, con obtención de H<sub>2</sub>, y que está en funcionamiento desde la primavera del 2010.

La planta piloto se alimenta con aproximadamente el 2 % del gas de síntesis producido en la planta GICC, es decir, 3.600 Nm<sup>3</sup>/h (base seca) que equivalen aproximadamente a 14 MWt.

#### Modos de operación

El gas de síntesis puede alimentarse a la planta piloto desulfurado (denominado gas dulce), es decir, aguas abajo de la unidad de desulfuración de la central GICC o aguas arriba de este sistema de desulfuración (denominado gas ácido), ya que ésta está diseñada para poder operar con ambos tipos de gases. Así el gas dulce denominado gas limpio presenta las características que se muestran en la siguiente tabla.

<b>Presión:</b>	22.6 bar
<b>Temperatura:</b>	137.6 °C
<b>Caudal:</b>	3.600 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Potencia:</b>	14 MWt
<b>Composición (% volumen)</b>	
<b>CO</b>	60.4
<b>H<sub>2</sub></b>	22.0
<b>CO<sub>2</sub></b>	2.6
<b>N<sub>2</sub></b>	14.0
<b>Ar</b>	1.0

Tabla 2 Características del gas de síntesis limpio que se alimenta a la planta piloto

La composición del gas sin desulfurar (ácido) varía ligeramente respecto a la anterior ya que presenta además H<sub>2</sub>S y COS.

A continuación se presenta el diagrama de bloques del proceso de la planta piloto, así como su integración con la planta GICC, tanto en gas de alimentación (gas dulce o limpio, y gas ácido o bruto) como en el destino de las corrientes (todas las corrientes generadas se devuelven al proceso por medio de un compresor existente).

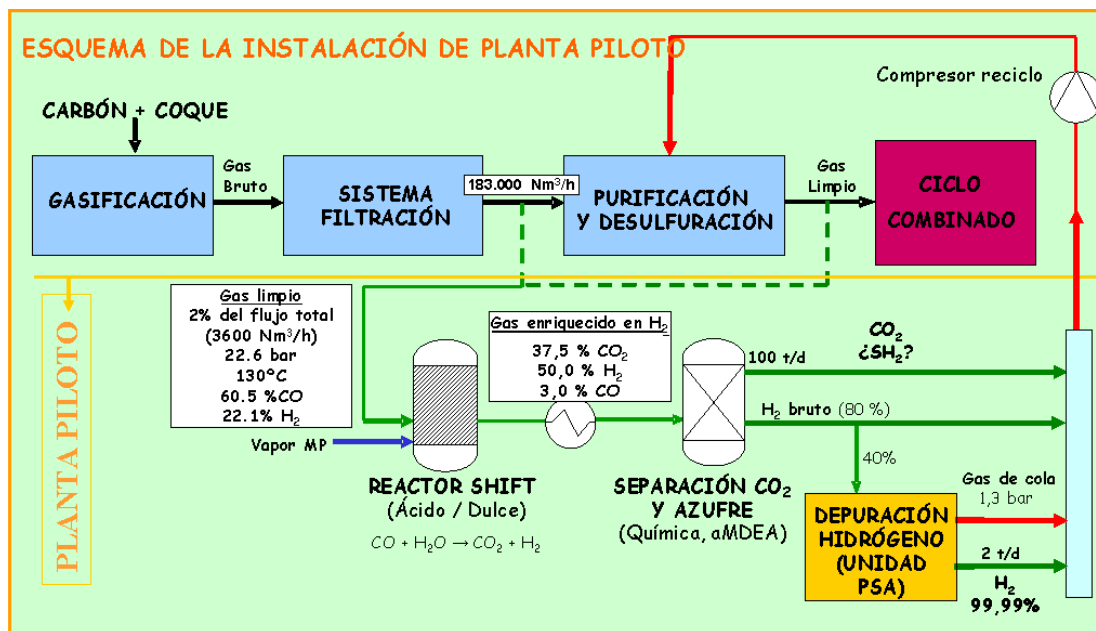


Figura 4. Esquema Planta Piloto Caputra de CO<sub>2</sub> y producción de H<sub>2</sub> de ELCOGAS



La planta piloto consta fundamentalmente de tres etapas bien diferenciadas tal y como se muestran en el siguiente esquema (incluyendo su integración con la planta de GICC) que se describen a continuación.

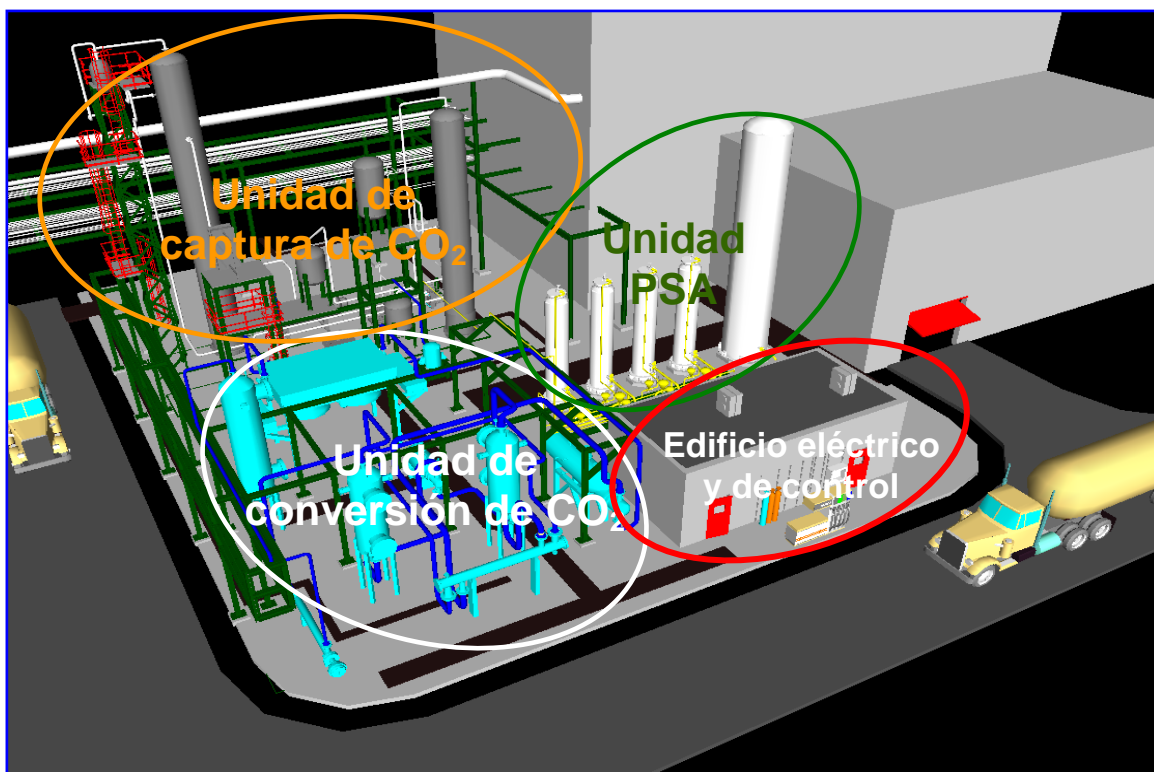
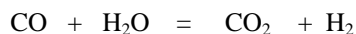


Figura 5. Recreación 3D de la planta piloto identificando sus unidades

#### Etapla nº 1: Conversión con vapor de agua (Unidad de conversión de CO<sub>2</sub>)

Esta primera etapa tiene por objeto modificar la composición del gas de síntesis, mayoritariamente formado por CO e H<sub>2</sub>, para aumentar su contenido de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.

En esencia, el proceso consiste en que el gas de síntesis procedente de la central GICC se desulfura en el reactor de desulfuración (consistente en un lecho relleno de absorbente de base óxido de Zn), se le inyecta vapor de media presión saturado utilizando un mezclador estático para conseguir una buena homogeneización de la corriente y posteriormente se calienta en un precalentador a 310 °C. A continuación, pasar por dos reactores catalíticos de conversión (*shift*) –suministrados por Johnson-Matthey- en donde se produce la conversión del CO a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> según la siguiente reacción química:



Así la mezcla gas-vapor se alimenta al primer reactor *shift*, que es de alta temperatura y se produce la reacción de conversión hasta alcanzar 480°C. Tras una etapa de enfriamiento intermedio la temperatura del gas se reduce a 350°C y entra en el segundo reactor *shift* donde reaccionará hasta 390°C aproximadamente permitiendo avanzar la reacción hasta el grado de conversión conveniente. Tras la conversión, el gas convertido se enfría en dos precalentadores hasta 160 °C, produciéndose vapor de agua a muy baja presión. A continuación, se enfría en un aerorrefrigerador hasta 80°C y finalmente termina de enfriarse alcanzando 45°C.

Tras este paso se obtiene un gas más rico en H<sub>2</sub> y con mayor contenido en CO<sub>2</sub> que el original, cuya composición es la siguiente (% volumen):



Presión	5.9 bar
Temperatura	45 °C
Composición (% volumen)	
H <sub>2</sub>	50.0
CO <sub>2</sub>	39.5
CO	3.0
N <sub>2</sub> + Ar	9.5

Tabla 3. Composición del gas enriquecido en H<sub>2</sub> (tras la etapa nº 1 de la planta piloto)

#### Etapa nº 2: Separación del CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> (Unidad de captura de CO<sub>2</sub>)

Esta segunda etapa tiene como misión separar de la corriente del gas el CO<sub>2</sub> y conseguir un gas más enriquecido en H<sub>2</sub>, para ello se utiliza un proceso no selectivo de absorción química.

Así, el gas enriquecido en H<sub>2</sub> procedente de la etapa de conversión (5.700 Nm<sup>3</sup>/h, ya que tras su paso por el “Shift Converter” aumenta el flujo de gas a tratar) se alimenta por el fondo a una columna de absorción de CO<sub>2</sub>, mientras que el absorbente entra por cabeza de la misma. El gas se lava en contracorriente con una disolución de amina (aMDEA, Metil-Di-Etanol-Amina activada) que permite capturar el CO<sub>2</sub>. Tras la captura del CO<sub>2</sub>, se obtiene una corriente concentrada en H<sub>2</sub> (denominado hidrógeno bruto) que sale por la cabeza de la columna de absorción cuya composición es:

Presión	15.6 bar
Temperatura	40 °C
Composición (% volumen)	
H <sub>2</sub>	77.4
CO <sub>2</sub>	6.5
CO	2.9
N <sub>2</sub> + Ar	13.2

Tabla 4. Composición del H<sub>2</sub> bruto tras la segunda etapa de la planta piloto

Esta corriente de hidrógeno bruto se puede enviar a la turbina de gas de la central GICC o pasar a la siguiente etapa de la planta piloto.

La amina cargada de CO<sub>2</sub> se alimenta a una columna de desorción donde el gas es desorbido por aumento de la temperatura y disminución de la presión. De esta forma, la amina se regenera y vuelve a la etapa de absorción en circuito cerrado tras ser enfriada. En la columna de desorción se obtiene una corriente muy concentrada en CO<sub>2</sub> de 100 t/día que se puede alimentar a la turbina de gas o se puede ventear a la atmósfera. El porcentaje de captura de CO<sub>2</sub> se estima que sea superior al 90 %.

#### Etapa nº 3: Purificación del H<sub>2</sub> (Unidad PSA)

Esta tercera etapa permite obtener H<sub>2</sub> puro partiendo de la corriente del hidrógeno bruto (77.4% de pureza) producido en la anterior etapa.

Así, una parte del H<sub>2</sub> bruto producido en el anterior paso (40 %) pasa a esta etapa para su purificación y el resto del H<sub>2</sub> bruto producido se conducirá a la turbina de gas.

El proceso de purificación consiste en separar los productos que acompañan al hidrógeno en esta corriente (CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, Ar) por medio de una unidad de PSA (*Pressure Swing Absorption*) en la que estas sustancias quedan atrapadas en un sistema absorbedor de lechos múltiples de material filtrante, mientras que el H<sub>2</sub> pasa a través de ellos libremente. Estos lechos operan en ciclos alternativos de adsorción y regeneración una vez que se agota su poder de captación para proporcionar un flujo continuo y constante de corriente

de hidrógeno. La unidad de purificación consta de cuatro etapas: adsorción, despresurización, regeneración final con purga a baja presión y re-compresión.

Una PSA, en su forma más simple, requiere dos lechos adsorbentes, de modo que mientras uno está en la etapa de adsorción el otro realiza las tres etapas de regeneración. Con un mínimo de cuatro lechos se minimizan las pérdidas de  $H_2$  originadas en la etapa de descompresión, al utilizarse el gas desorbido para aumentar la presión de otros lechos en etapa de re-compresión.

La capacidad de producción estimada de  $H_2$  puro es 2 t/día y su pureza final prevista del 99.99 % volumen (pureza para usos comerciales). Se espera una recuperación total del  $H_2$  superior al 95 %.

El gas pobre generado en las fases de regeneración de la PSA denominado gas de cola, puede ser enviado también a la turbina de gas o puede utilizarse como fuente de calor en otros procesos.



Figura 6. Detalle de la unidad de purificación de  $H_2$  (Unidad PSA)

La siguiente tabla resume las principales características de las corrientes de entrada y salida de la planta piloto:

Características del gas de síntesis limpio (entrada a planta piloto)				
<b>Caudal</b>	3.600 Nm <sup>3</sup> /h (base seca)			
<b>CO (% volumen)</b>	60.5			
<b>H<sub>2</sub> (% volumen)</b>	22.1			
Características de las corrientes de salida de CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> (salida de planta piloto)				
<b>Producción de CO<sub>2</sub></b>	100 t/día	<b>Porcentaje de captura de CO<sub>2</sub></b>	> 90%	
<b>Producción de H<sub>2</sub> puro</b>	2 t/día	<b>Pureza H<sub>2</sub> puro</b>	99.99%	
<b>Producción de H<sub>2</sub> bruto</b>	5 t/día	<b>Pureza H<sub>2</sub> bruto</b>	77.4 %	

Tabla 5. Resumen de las características técnicas de la planta piloto

Dentro de los hitos alcanzados por esta planta, cabe destacar que la obra civil se inició en el año 2008 y que la puesta en marcha tuvo lugar en mayo de 2010, consiguiendo su primera tonelada de CO<sub>2</sub> capturada en octubre de 2010.

Podemos considerar que la tecnología IGCC puede claramente contribuir a la captura de CO<sub>2</sub> con varias ventajas en nuestro caso, además de disponer de un uso evidente de valorización de CO<sub>2</sub> para la fabricación de biodiesel procedente de algas, la masiva producción de H<sub>2</sub>, supone un verdadero uso industrial para la fabricación de pilas de combustible.

### 2.3 Captura en Oxyfuel.

Este proceso se realiza durante la combustión y tiene un largo recorrido como tecnología aplicada. Básicamente consiste en la utilización de oxígeno en lugar de aire para la combustión, de ahí que los gases de escape están compuestos principalmente de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, que puede separarse fácilmente del vapor de agua mediante condensación.

Se presenta un esquema básico de funcionamiento. Esta tecnología es utilizada en centrales de nueva generación con ciclos agua-vapor extremadamente crítico, así como también en Turbinas de Gas con o sin calderas de recuperación.

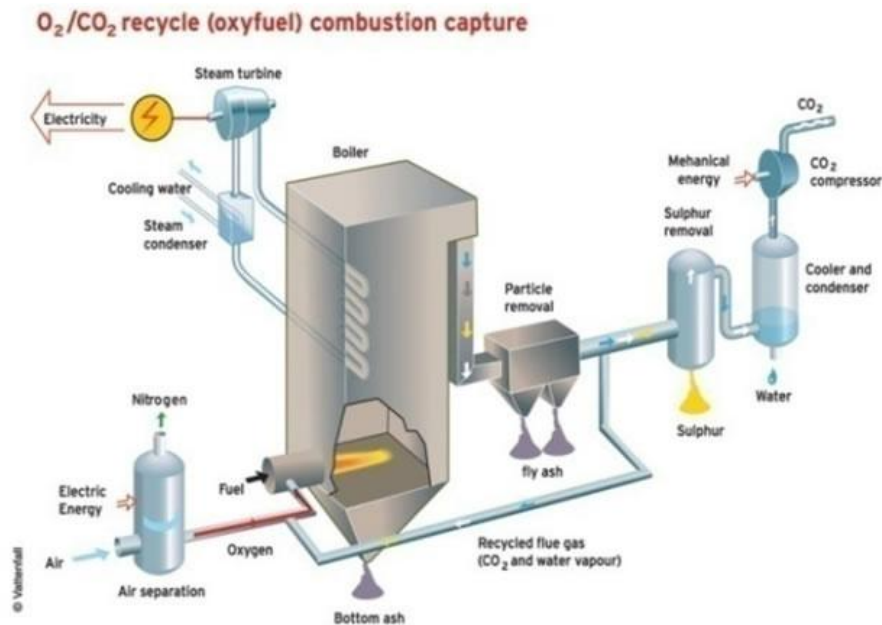


Figura 7. Esquema de Oxifuel.

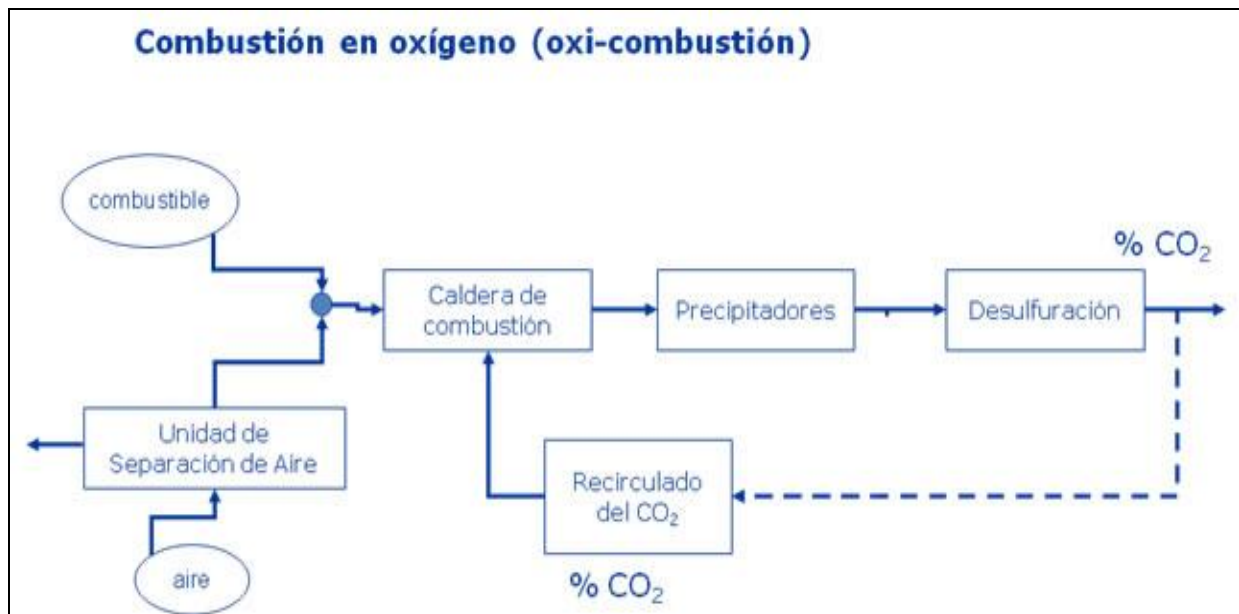


Figura 8. Diseño y esquema de operación de la oxi-combustión

Al ser una tecnología que está actualmente desarrollándose, existen muchos proyectos de investigación en el tema buscando mejores desempeños y eficiencias de costos. En la siguiente tabla se presentan los aspectos más importantes a desarrollar en los diferentes aspectos de esta tecnología.

Tabla 6. Aspectos a desarrollar en la calcificación/carbonización

Aspecto del proceso	Áreas críticas de desarrollo
ASU (Unidad de separación de aire)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Destilación criogénica. Consumo de auxiliares.</li> <li>2. Membranas cerámicas que incrementan la eficiencia.</li> </ol>
Combustión O <sub>2</sub>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Combustión, ignición, estabilidad de llama, temperaturas y perfiles de llama.</li> <li>2. Volumen del hogar. Absorción térmica por unidad de superficie.</li> <li>3. Grado de recirculación CO<sub>2</sub>.</li> </ol>
Filosofía de operación	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Flexibilidad de operación.</li> <li>2. Integración de la ASU.</li> <li>3. Disposición chorros de O<sub>2</sub> puro, CO<sub>2</sub> recirculado y transporte de carbón.</li> </ol>
Emisiones	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La cinética del NO<sub>x</sub> en llamas de carbón no es aplicable.</li> <li>2. Cinética del SO<sub>2</sub>.</li> <li>3. Composición de las cenizas.</li> </ol>
Materiales	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Propiedades de operación a largo plazo y altas temperaturas.</li> <li>2. Ensayos de materiales avanzados ultrasupercríticos.</li> <li>3. Potencial de corrosión para carbones con altos contenidos de cenizas, S, Cl.</li> </ol>

En el seno de la UE, cabe destacar la planta de demostración de Vattenfall ( Alemania) y la planta de demostración de El Bierzo ( León, España) , ambas cuentan con financiación de la UE.

### 3 Valorización el CO<sub>2</sub>. Proyectos.

La seguridad de suministro, y la posibilidad de desarrollar una forma de transporte más ecológica, cómo el coche electric, necesitan de una fuente no intermitente y continúa de energía convencional que no dependa de las variaciones climáticas y que por tanto complemente y de soporte al desarrollo de las energías renovables, cuya presencia aumentará exponencialmente en los próximos años. El uso del carbón de manera limpia, capturando el CO<sub>2</sub> va a ser una realidad y una necesidad en los próximos años.

Almacenar el CO<sub>2</sub> es una de las posibles soluciones, que además podrán permitir la recuperación de mayor cantidad gas natural.No sólo se debe buscar cómo única solución con el CO<sub>2</sub> capturado su enterramiento, sino que el aprovechamiento del CO<sub>2</sub> de manera industrial debe ser investigada por la comunidad científica para que las emisiones procedentes de la escala comercial de los próximos proyectos de captura de CO<sub>2</sub> puedan ser absorbidas de manera competitiva.

Además de los aprovechamientos actuales de CO<sub>2</sub> cómo en la alimentación, tratamientos de agua, y procesos industriales, existen otras posibilidades.

En España se están desarrollando dos proyectos importantes de valorización de CO<sub>2</sub>.

### **3.1. Proyecto Invernaderos.**

La central de Carboneras ( Almería, Spain), propiedad de la empresa eléctrica ENDESA, está muy próxima a la mayor extensión europea de invernaderos para la producción de tomates.. Estamos hablando de una superficie de 26.500 hectáreas ( el equivalente a 65.500 acres), donde las necesidades de CO<sub>2</sub> son potencialmente enormes. El Dióxido de Carbono inyectado en los invernaderos aumenta el rendimiento de los cultivos.

### **3.2. Proyecto alga biodiesel.**

En España se están desarrollando varios proyectos para la generación de microalgas que usarán el CO<sub>2</sub> capturado para la creación de biodiesel.

Uno de los más importantes se realiza también en la central de Carboneras (Almería, Spain), que junto con la inyección del dióxido de carbono en los invernaderos, la sitúan como la central que está más próxima a desarrollar la valorización del CO<sub>2</sub>. Carboneras es uno de los proyectos impulsados por el programa de investigación CENIT CO<sub>2</sub> <sup>[4]</sup> impulsado por el Ministerio <sup>[5]</sup> de Ciencia e Innovación de España.

Otro proyecto importante en el desarrollo de las microalgas para la generación de biodiesel, está liderado por la empresa española REPSOL, donde una de sus refinerías está situada en la misma localidad que la central térmica IGCC de ELCOGAS, como se ha visto en el apartado 2. El CO<sub>2</sub> capturado en ELCOGAS servirá como alimento a las microalgas.

Las ventajas de las plantaciones de microalgas, en general radican en ser uno de los organismos fotosintéticos más eficientes en utilizar la energía solar, del 8% frente al 2% del resto de cultivos. Existen estimaciones de productividades tan altas como 60-80 toneladas de peso seco por hectárea (2,47 acres) al año, mientras que para el resto de cultivos convencionales, se producen del orden de 10 a 30 toneladas.

La fabricación de biodiesel en los citados proyectos españoles en fase de demostración, se obtendrán de 150 a 300 Kg de biodiesel por hectárea al día.

Respecto a los costes de producción y según Y.Chisti<sup>[6]</sup> estima que para la producción de biomasa de microalga cuesta 2,95 \$ si procede de tecnología en fotobiorreactores , más barato que en los sistemas de carruseles cuyo precio de obtención sería de 3,50 \$. Estas estimaciones asumen que el CO<sub>2</sub> estaría disponible sin ningún coste, algo que no es correcto, pero que sí se abarataría mucho con la producción a gran escala de la CSS y la proximidad de los sistemas de producción de algas a las fuentes generadoras de CO<sub>2</sub>. Para la producción de anual de biomasa de 10.000 toneladas, el coste de producción por kilogramo se reduce a 0,47 \$ en el caso de fotobiorreactores y de 0,60 \$ para sistemas abiertos de carrusel. La biomasa tiene en torno al 30% de aceite en peso cuyo coste de producción estaría entre 1,40 y 1,81 \$. Un precio razonable sería de 0,48 \$ por lo que el objetivo estratégico sería reducir sus costes de producción.

El desarrollo de estos proyectos, estudiando el tipo de alga más idónea, los subproductos que se obtengan en una biorefinería próxima y su mayor valor añadido, como los fertilizantes, el biogas, y productos farmacéuticos que se puedan derivar del proceso en la refinería.

## **4 Repercusiones económicas en un país productor. Caso España.**

En la actualidad se producen en España 9 millones de toneladas ( hard coal) que alimentan a un total 8 centrales eléctricas que consumen carbón en un mix generalmente 60% carbón autóctono, con 40% de carbón doméstico. La generación de electricidad de las centrales eléctricas que consumen carbón en España generan en torno al 20% de la electricidad del país. Prescindir de esta tecnología por las emisiones de CO<sub>2</sub>, sería una catástrofe económica en un país productor. Estamos hablando de que las centrales eléctricas de carbón deberían ser por tanto sustituidas por otras centrales térmicas de combustible importado.

En la actualidad se está hablando de la edad de oro del gas natural. Para un país como España supone una dependencia total de este combustible en el caso de cerrar la minería del carbón. No debemos olvidar que el éxito de los ciclos combinados alimentados con gas, es su alta eficiencia que supera el 65% del rendimiento y que por lo tanto provoca una menor emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, pero también esta tecnología se enfrenta al reto de la captura del CO<sub>2</sub>, si quiere considerarse una tecnología limpia.

Por tanto, prescindir del carbón, y pasar a una dependencia del gas natural para un país como España, que su único combustible de origen fósil es el gas, provoca un fuerte desequilibrio en su deuda externa. En la actualidad el 50 % de las importaciones en España proceden de los productos energéticos. Una condena económica que empobrece a un país dependiente energéticamente del exterior en más del 87%, superando ampliamente la media europea.

En términos de económicos, las inversiones necesarias para la generación térmica superan los 15.000 millones de euros, que deberían ser en plantas nucleares o de ciclo combinado de gas. Además, dichos ciclos combinados deberían desarrollar plantas de captura de CO<sub>2</sub>. Incrementando en 5000 millones de euros la inversión.

La importación de combustible para España que sustituyera al carbón doméstico está entorno a los 4000 millones de euros al año. El ahorro y la eficiencia energética es un reto a conseguir, pero también las previsiones de crecimiento de la demanda en los próximos años sustituirá el hueco térmico libre debido al ahorro.

Por tanto, permanecer con las plantas térmicas de carbón, y capturar el CO<sub>2</sub>. Supone una inversión para España de solo 5000 millones de euros, y un ahorro anual de combustible de más de 4000 millones de euros.

## **5 Beneficios ligados a la captura de CO<sub>2</sub>. Coche eléctrico. Ciudades limpias.**

La captura de CO<sub>2</sub> para la combustión del carbón es un reto que debe ser apoyado por los gobiernos y la comunidad internacional. Las reservas de carbón en el mundo superan los 140 años de consumo. Tiempo suficiente para el desarrollo de las tecnologías renovables, que sean capaz de almacenar la energía que demande la sociedad en el futuro.

Su disponibilidad mundial, lo coloca como el combustible que lleva asociada menos conflictividad mundial. Casi todos los países poseen reservas de carbón, bien de lignito pardo o bien de hard coal.

El desarrollo del coche eléctrico, dependerá claramente de los precios de la electricidad a futuro y éstos a su vez de las tecnologías, que se utilicen para la generación de electricidad.

La generación de electricidad con carbón, tiene un coste medio de 45€/MWh, frente a la generación con captura de CO<sub>2</sub>. Está cifrada en 65€/MWh, Incluyendo tecnologías CSS, sigue siendo más barata que la tecnología solar y la eólica.

Capturar el CO<sub>2</sub> procedente de la combustión del carbón, provocará una contención de los precios de electricidad, además de un aporte continuo a demanda de la electricidad para la recarga de las baterías incluyendo las horas nocturnas.

De esta manera las ciudades tender vehículos eléctricos, serán lugares libres de contaminación, mientras en las plantas de carbón, se capturará el CO<sub>2</sub>, usándolo posteriormente en la generación de biodiesel ( Proyecto Repsol, Puertollano, Spain) y en los invernaderos donde se acelerará el ciclo de los vegetales, con el aporte del CO<sub>2</sub>. ( Proyecto Carboneras, Almería , Spain)

---

[1] Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (EETE). Documento completo [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/european\\_energy\\_policy/127079\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/127079_es.htm)

[2] ZEP <http://www.zeroemissionsplatform.eu/>

[3] Plataforma Española del CO<sub>2</sub>. <http://www.pteco2.es/>